



دانشگاه گوارن و فناوری چوب

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل

جلد بیست و پنجم، شماره چهارم، ۱۳۹۷

<http://jwfst.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwfst.2018.15280.1758

## بررسی ترکیب فورفورال - اوره برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی مکانیکی چوب توس

داود افهامی سیسی<sup>۱</sup>، مرضیه شریفیات<sup>۲</sup>، ماری-فرانس تونون<sup>۳</sup>، اصغر طارمیان<sup>۴</sup> و مهدی جنوبی<sup>۵</sup>

استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه تهران، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد رشته علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه تهران،  
سرپرست آزمایشگاه حفاظت چوب موسسه تحقیقاتی سیراد، فرانسه و استاد دانشگاه مون‌پلیه - گروه بیووب، سیراد، فرانسه،<sup>۵</sup> دانشیار گروه

علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه تهران،<sup>۶</sup> دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۷

### چکیده

**سابقه و هدف:** اشباع چوب با انواع تک‌پار و تبدیل آن به یک بسپار غیرقابل آبشویی موجب دستیابی به یک محصول جدید به نام چوب بسپار می‌شود. ترکیبات فورانی مانند الکل فورفوریل به‌طور تجاری برای اصلاح چوب و ساخت چوب بسپار استفاده می‌شوند. چوب با الکل فورفوریل اشباع شده و سپس با حرارت‌دهی تبدیل به پلی‌الکل فورفوریل می‌شود. در ایران مقدار زیادی فورفورال از ضایعات ساقه نیشکر تولید می‌شود که در واقع ماده اولیه ساخت الکل فورفوریل است. فورفورال مانند الکل فورفوریل به تنهایی قابلیت تبدیل به بسپار را ندارد، اما این ماده یک آلدئید است و می‌تواند با اوره واکنش داده و ساختار پلیمری تشکیل دهد. در این پژوهش امکان بهبود ویژگی‌های فیزیکی - مکانیکی چوب توس با استفاده از ترکیب فورفورال + اوره و یک کاتالیزور اسیدی (انیدرید مالئیک) بررسی شد.

**مواد و روش‌ها:** چوب توس (*Betula sp.*) وارداتی از کشور روسیه برای انجام مطالعات استفاده شد. ترکیب فورفورال + اوره / انیدرید مالئیک به صورت تیمار دو مرحله‌ای و با استفاده از روش خلاء / فشار به چوب تزریق شد، مرحله اول: فورفورال رقیق شده در آب و متانول، مرحله دوم: محلول آبی اوره / انیدرید مالئیک. همچنین برای مقایسه نتایج از فرمول تجاری سازی شده بر پایه الکل فورفوریل نیز برای اشباع و تیمار چوب استفاده شد. برای پخت مواد و تبدیل آنها به بسپار، چوب‌های اشباع شده حرارتی‌دهی شدند. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها طبق روش‌ها و استانداردهای سری ISO 13061 اندازه‌گیری و گزارش شد.

**یافته‌ها:** نسبت موجود بین فورفورال + اوره / انیدرید مالئیک مناسب بوده و به‌طور میانگین ۸۰-۶۰ درصد ترکیبات طی فرآیند پخت رزین تبدیل به بسپار شدند. نرخ آبشویی مواد از چوب در حدود ۴ درصد بود که قابل مقایسه با فرمول تجاری بر پایه الکل فورفوریل است. مقادیر افزایش وزن نمونه‌ها (WPG) با توجه به غلظت فورفورال از ۲۷ تا ۵۷ درصد متفاوت بود. با وجود اثر حجیم‌کنندگی، چگالی نمونه‌ها پس از تیمار افزایش محسوس داشت. نتایج

\*مسئول مکاتبه: [efhami@ut.ac.ir](mailto:efhami@ut.ac.ir)

اندازه‌گیری جذب آب نمونه‌ها پس از غوطه‌وری در آب نشان داد که مقدار جذب آب بستگی به مقدار WPG دارد و با افزایش آن کاهش می‌یابد. واکنش‌پذیری ابعاد نمونه‌های تیمار شده با ترکیب فورفورال+اوره/انیدرید مالئیک نیز با افزایش WPG کاهش یافت، اما کمترین مقدار واکنش‌پذیری ابعاد مربوط به تیمار الکل فورفوریل بود. بررسی مقاومت‌های مکانیکی نشان داد که تیمار چوب با ترکیب فورفورال+اوره/انیدرید مالئیک سبب کاهش مقاومت به سختی و مقاومت به ضربه چوب می‌شود، در حالی که مقاومت‌های استاتیکی مانند مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته و فشار موازی الیاف افزایش یافتند. تیمار با الکل فورفوریل نیز موجب کاهش مقاومت به ضربه چوب شد.

**نتیجه‌گیری:** تیمار چوب با ترکیب فورفورال+اوره/انیدرید مالئیک بویژه در مقادیر WPG بالا پتانسیل خوبی برای بهبود اغلب ویژگی‌های چوب را دارد. اسیدیته بالای محلول‌های اشباع بر پایه فورفورال یکی از مواردی است که نیاز به مطالعات تکمیلی دارد. در صورت استفاده از pH قلیایی‌گرای رزین دچار اختلال شده و نرخ آبشویی مواد افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر pH اسیدی نیز اثر تخریبی بر روی چوب دارد.

**واژه‌های کلیدی:** توس (*Betula sp.*)، فورفورال، الکل فورفوریل، اوره، ویژگی‌های فیزیکی - مکانیکی

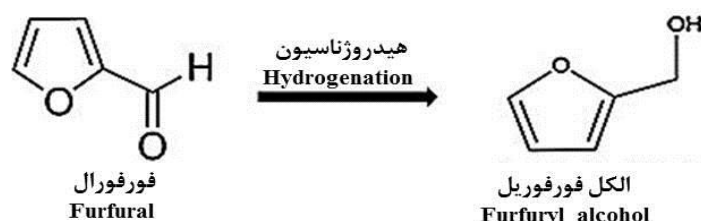
#### مقدمه

در سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی برای بهبود خصوصیات مختلف چوب مانند پایداری در برابر تغییرات رطوبتی، افزایش مقاومت آن در برابر تنش‌های مکانیکی، بهبود دوام زیستی، افزایش مقاومت به هوازگی و غیره با تکیه بر انواع روش‌های اصلاح چوب صورت گرفته است. اصلاح چوب با روش‌های مختلفی اعم از تیمار حرارتی، شیمیایی، آنزیمی و غیره صورت می‌گیرد و اساس همه آن‌ها یافتن روشی دوست‌دار محیط زیست برای بهبود ویژگی‌های چوب است (۱). یکی از روش‌های اصلاح چوب آغشتگی آن با انواع تک‌پارها و تولید یک فرآورده جدید به نام چوب بسیار است. بدین منظور می‌توان از انواع تک-پارهای مختلف استفاده کرد. استفاده از مونومرهای ونیل (۲)، فورفوریل الکل (۳)، رزین‌های آمینی و فنولی (۴)، ترکیبات سیلکونی (۵) و غیره بارها مورد استفاده قرار گرفته‌اند و برخی از آن‌ها به مرحله تجاری‌سازی رسیده‌اند (۱). واژه چوب بسیار (چوب پلیمر) معمولاً به فرآورده‌هایی اطلاق می‌شود که ماده مورد استفاده برای اصلاح چوب پس از بارگذاری در

داخل آن با یکی از روش‌های رایج (مانند حرارت-دهی، سخت‌کننده، تشعشعات و غیره) بسیار یافته و سخت می‌شود. بسیار تشکیل یافته در چوب، موجب واکنش‌پذیری دیواره سلول‌های چوبی و یا پر شدن حفره‌های سلولی می‌شود که به دنبال آن بسیاری از ویژگی‌های چوب بهبود می‌یابد (۶).

اصلاح چوب با الکل فورفوریل را در اصطلاح فورفوریل‌اسیون چوب می‌نامند که یک فرآیند دوست‌دار محیط زیست است (۷) و می‌تواند بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و دوام زیستی چوب را بهبود دهد (۸-۱۰). چوب‌های اصلاح شده با روش فورفوریل‌اسیون هم اکنون در کشور نروژ با نام تجاری کیبونی<sup>۱</sup> تولید شده و در بازارهای جهانی عرضه می‌شوند (۹ و ۱۱). چوب کیبونی دارای طیفی از رنگ‌های قهوه‌ای روشن تا قهوه‌ای تیره است که بستگی به مقادیر افزایش وزن حاصل از بارگذاری رزین در چوب دارد. چوب اصلاح شده با رزین الکل فورفوریل اغلب برای کف‌پوش، پنجره‌سازی، مبلمان

الکل فورفوریل ( $C_5H_6O_2$ ) از هیدروژنه کردن فورفورال به دست می آید. فورفورال ( $C_5H_4O_2$ ) یک آلدئید است و از هیدرولیز اسیدی ضایعات کشاورزی مثل تفاله نیشکر، ملاس، پوست جو و ساقه ذرت تهیه می شود (۱۳) (شکل ۱). فورفورال در صنایع رنگ و رزین، چسب سازی، پلاستیک، مصارف دارویی، کشاورزی، تولید روغن و کاغذسازی کاربرد فراوان دارد (۱۵-۱۷).



شکل ۱- واکنش هیدروژناسیون فورفورال و تبدیل آن به الکل فورفوریل (۱۴).

Figure 1. Hydrogenation reaction of Furfural and its conversion into the Furfuryl alcohol (14).

(۱۵ و ۱۸). ایشان اثر این تیمارها را بر روی ثبات ابعاد بررسی کردند اما دیگر ویژگی ها از قبیل مقاومت به آبشویی رزین سخت شده در داخل چوب و همچنین مقاومت های مکانیکی چوب های تیمار شده مورد بررسی قرار نگرفت.

در این پژوهش با غلظت های متفاوتی از فورفورال- اوره، فرمول بندی های مختلفی برای تیمار چوب تهیه شد و سپس ویژگی های مختلف فیزیکی- مکانیکی و همچنین مقدار آبشویی مواد از چوب بررسی شد. چوب مورد استفاده در این تحقیق گونه توس یا همان غان (*Betula pendula*) است که یک پهن برگ وارداتی از کشور روسیه است. این گونه مانند صنوبر تند رشد بوده و قابلیت برش خوری، رنگ و پوشش و همچنین چسب خوری نسبتاً خوبی دارد (۱۹). چوب توس ثبات ابعاد کمی دارد و دوام آن در برابر قارچ های عامل پوسیدگی ناچیز است (۱ و ۲۰). با توجه به طرح استراحت جنگل های شمال کشور، به نظر می رسد در سال های آینده بیشتر نیاز صنعت

باغی، صنعت کشتی سازی و غیره استفاده می شود و از طرفی با توجه به مقاومت آن ها در برابر اسیدها در ساخت صفحات روی میزهای آزمایشگاهی و همچنین دسته ابزارها نیز کاربرد دارد (۱۲ و ۱۳). در فرآیند فورفوریلاسیون چوب از الکل فورفوریل، کاتالیزور اسیدی، عامل بافری و آب یا اتانول (به عنوان حلال) استفاده می شود (۱۴).

در کشور ما سالانه در حدود ۵۰۰۰ تن فورفورال توسط شرکت ملی نفت بهران از باگاس نیشکر تولید می شود (۱۷). فورفورال بر خلاف الکل فورفوریل به تنهایی قابلیت رزینی شدن ندارد اما می تواند مانند فرمالدهید با واکنشگرهای ثانویه مثل تانن، اوره، ملامین و فنل واکنش داده و به بسپار سخت تبدیل شود (۱۵). اگرچه مطالعات وسیعی در مورد اصلاح چوب با الکل فورفوریل صورت گرفته است اما در خصوص اصلاح چوب با فورفورال گزارش های کمی وجود دارد. اصلاح چوب با فورفورال به همراه یک واکنشگر ثانویه (اوره) تنها در دو ثبت اختراع بین المللی به شماره های US2009/0004495 A1 و US 2009/0005504 A1 در سال ۲۰۰۷ مطرح شده است (۱۵ و ۱۸). اشنایدر و فیلیپس (a و b ۲۰۰۷) دو فرمول مختلف بر اساس ترکیب فورفورال- اوره برای حفاظت اصلاحی چوب ابداع کردند. تفاوت این دو فرمول در روش اشباع و همچنین غلظت مواد بود که سبب دستیابی به مقادیر افزایش وزن متفاوت می شد

ضایعات ساقه نیشکر (باگاس) تولید می‌شود. اوره ۹۹/۵ درصد، انیدرید مالئیک ۹۹ درصد به‌عنوان کاتالیزور و دی‌سدیم تترابورات ۹۹/۵ درصد به‌عنوان عامل بافر کننده از شرکت Chem-Lab بلژیک خریداری شد. الکل فورفوریل ۹۸ درصد نیز از شرکت Merck آلمان تهیه شد.

**برش و تهیه نمونه‌ها:** نمونه‌های چوبی موردنیاز با توجه به استانداردهای مربوطه تهیه شد (جدول ۱). نمونه‌ها قبل از اشباع، در آن ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک‌شده و سپس وزن ( $m_1$ ) و حجم ( $v_1$ ) آنها اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها از ترازوی ۰/۰۱ گرم و برای اندازه‌گیری ابعاد از کولیس ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شد.

چوب باید از بخش واردات تأمین شود. به تازگی تمایل زیادی به واردات چوب توس و استفاده از آن در صنعت شکل گرفته است. در حال حاضر توس از کشور روسیه و جنگل‌های حاشیه سیبری و بندر آستاراخان به‌صورت گرده‌بینه‌های پوست‌کنی شده وارد کشور می‌شود.

### مواد و روش‌ها

**مواد استفاده شده:** برای اجرای این تحقیق از چوب وارداتی توس (*Betula sp.*) از کشور روسیه استفاده شد. چوب‌ها قبل از استفاده به مدت دو ماه در هوای آزاد خشک شدند. فورفورال ۹۸/۵ درصد از شرکت ملی نفت بهران واقع در شهر شوشتر استان خوزستان تهیه شد. در این شرکت فورفورال از هیدرولیز اسیدی

جدول ۱- ابعاد نمونه‌ها با توجه به استانداردهای ISO 13061

Table 1. Dimensions of samples according to ISO 13061 standards.

| منبع<br>Reference | شماره استاندارد<br>Standard No. | ابعاد نمونه<br>Dimensions of sample<br>(مماسی×شعاعی×طول)<br>mm <sup>3</sup><br>(Longitudinal×Radial×Tangential) | آزمون<br>Test  |
|-------------------|---------------------------------|---|--|
| (21)              | ISO 13061-13 (2016)             | 30×20×20  | ویژگی‌های فیزیکی<br>Physical characteristics                                   |
| (22)              | ISO 13061-2 (2014)              |   | (جذب آب و واکنشیدگی ابعاد، چگالی)<br>(Water absorption, Swelling, Density)     |
| (23)              | ISO 13061-12 (2014)             | 50×50×50  | سختی<br>Hardness   |
| (24)              | ISO 13061-17 (2014)             | 60×20×20  | فشار موازی الیاف<br>Compression parallel to the grain                          |
| (25)              | ISO 13061-10 (2014)             | 300×20×20   | مقاومت به ضربه<br>Impact bending   |
| (26)              | ISO 13061-3 (2014)              | 300×20×20   | مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته<br>Modulus of Rupture and Modulus of Elasticity |

آب (۸ گرم در لیتر) برای داشتن محلول یکنواخت و روان، نسبتی از متانول به محلول اشباع اضافه شد. بدین منظور از محلول آب : متانول با نسبت ۶۰ : ۴۰ برای رقیق کردن فورفورال استفاده شد. برای اجرای روش سلول خالی ابتدا نمونه‌ها در داخل سیلندر قرار

شرح تیمارها و تهیه محلول‌های اشباع: تیمار نمونه‌ها با ترکیب فورفورال- اوره در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول نمونه‌ها به روش سلول خالی با محلول آبی- متانولی فورفورال در غلظت‌های مختلف اشباع شدند. به دلیل انحلال‌پذیری کم فورفورال در

شد. پس از اتمام مرحله فشار، محلول داخل سیلندر تخلیه شده و خلاء نهایی به مقدار ۰/۵ بار و مدت ۱۵ دقیقه اعمال شد. پس از این مرحله نیز وزن خیس نمونه‌ها (m<sub>3</sub>) دوباره اندازه‌گیری شد.

تیمار با الکل فورفوریل برای مقایسه نتایج این تحقیق با روش تجاری اصلاح چوب با آن انجام شد. برای رسیدن به درصد افزایش وزن تقریبی ۳۰ درصد از محلول آبی الکل فورفوریل ۲۸ درصد استفاده شد. همچنین به مقدار ۲ درصد انیدرید مالئیک (به‌عنوان کاتالیزور اسیدی) و ۴ درصد دی سدیم تترابورات (به‌عنوان محلول بافر) بر مبنای وزن کل محلول به آن اضافه شد. برای اشباع نمونه‌ها با الکل فورفوریل از روش سلول پر استفاده شده که شرح آن در بخش قبل آمده است.

پس از اتمام هر تیمار، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در فضای آزمایشگاه قرار گرفتند تا برای مرحله پخت رزین آماده‌سازی شوند.

گرفتند و سپس فشار ۴ بار بر روی آن‌ها اعمال شد، پس از این دوره محلول اشباع با استفاده از فشار مضاعف (۶ بار) بر روی نمونه‌ها ریخته شده و به مدت ۲ ساعت اعمال شد. در پایان مرحله فشار مضاعف، سیلندر از محلول اشباع خالی شده و سپس خلاء نهایی به مقدار ۰/۵ بار و به مدت ۱۵ دقیقه انجام شد. پس از اعمال خلاء نهایی و توزین نمونه‌ها داخل سیلندر از باقی‌مانده محلول فورفورال پاک‌سازی شده و نمونه‌ها مجدد داخل آن قرار گرفتند. در جدول ۲ فرمول‌بندی تیمارهای مختلف و غلظت مواد در هر کدام از آن‌ها آمده است.

در مرحله دوم محلول آبی اوره و انیدرید مالئیک با غلظت‌های مختلف ساخته شده و با استفاده از روش سلول پر به داخل نمونه‌ها تزریق شد. برای انجام روش سلول پر، پس از اعمال خلاء اولیه به مقدار ۰/۷ بار و مدت ۳۰ دقیقه، محلول اوره/انیدرید مالئیک به داخل سیلندر وارد شد. سپس فشار داخل سیلندر تا ۶ بار افزایش یافته و به مدت ۲ ساعت حفظ

جدول ۲- تیمارهای استفاده شده برای اشباع نمونه‌ها با ترکیب فورفورال- اوره و الکل فورفوریل.

| ردیف | شرح تیمار   | کد  |
|------|---|---|
| No.  | Treatment   | Code  |
| 1    | شاهد<br>Control   | C   |
| 2    | فورفورال ۲۰٪ + اوره ۱۰٪ + انیدرید مالئیک ۱۰٪<br>Furfural 20% + Urea 10% + Maleic Anhydride 10%  | F <sub>20</sub> +U <sub>10</sub> /M <sub>10</sub> |
| 3    | فورفورال ۴۰٪ + اوره ۱۲٪ + انیدرید مالئیک ۱۲٪<br>Furfural 40% + Urea 12% + Maleic Anhydride 12%  | F <sub>40</sub> +U <sub>12</sub> /M <sub>12</sub> |
| 4    | فورفورال ۶۰٪ + اوره ۱۲٪ + انیدرید مالئیک ۱۲٪<br>Furfural 60% + Urea 12% + Maleic Anhydride 12%  | F <sub>60</sub> +U <sub>12</sub> /M <sub>12</sub> |
| 5    | فورفورال ۷۰٪ + اوره ۱۵٪ + انیدرید مالئیک ۱۵٪<br>Furfural 70% + Urea 15% + Maleic Anhydride 15%  | F <sub>70</sub> +U <sub>15</sub> /M <sub>15</sub> |
| 6    | الکل فورفوریل ۲۸٪ + انیدرید مالئیک ۲٪ + دی سدیم تترابورات ۴٪<br>Furfuryl Alcohol 28% + Maleic Anhydride 2% + Tetra Borate Disodium 4% | FA  |

۲ و ۳ مقدار بارگذاری ماده اصلی در داخل چوب محاسبه شده و نسبت آنها قبل از مرحله پخت نمونه‌ها به صورت نسبتی از ۱۰۰ گزارش شد.

$$F = \frac{(m_2 - m_1) \times C_F}{m_1} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن،  $F$  مقدار وزنی جذب خالص فورفورال در پایان مرحله اول و  $C_F$  غلظت فورفورال در محلول است.

$$U + M = \frac{(m_3 - m_1) \times C_{UM}}{m_1} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن،  $U+M$  مقدار وزنی جذب خالص اوره و انیدرید مالئیک و  $C_{UM}$  غلظت آنها در محلول است.

با استفاده از مقادیر نظری جذب فورفورال و اوره/انیدرید مالئیک و همچنین با تناسب‌های ساده ریاضی نرخ تبدیل مواد به بسپار در داخل چوب محاسبه شد. **آزمون آبشویی:** آزمون آبشویی به مدت ۱۴ روز طبق استاندارد (EN84 (1997) انجام شد و نمونه‌ها در این مدت به صورت کامل در آب غوطه‌ور شدند. برای اجرای آزمون، ۵ نمونه از هر تیمار به صورت جداگانه در دیسیکاتور خلاء قرار داده و به مقدار ۵ برابر حجم آنها در داخل دیسیکاتور آب مقطر ریخته شد و به مدت ۲۰ دقیقه خلاء ۴ کیلوپاسکال اعمال شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در همان آب اولیه در فشار اتمسفر رها شده و بعد از آن اولین تعویض آب انجام شد. روز اول و دوم تعویض آب طبق استاندارد انجام شد. در ۱۲ روز باقی مانده نیز طبق استاندارد ۹ تعویض آب دیگر صورت گرفت که در فواصل زمانی حداقل ۲۴ ساعت و حداکثر ۷۲ ساعت بود. پس از آزمون و در پایان روز چهاردهم نمونه‌ها به مدت ۲ روز در محیط آزمایشگاهی قرار گرفتند و پس از آن در آن ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد خشک و توزین شدند. مقدار کاهش وزن نمونه‌ها بر اثر آبشویی با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد.

$$W.L = \frac{m_4 - m_5}{m_4} \times 100 \quad \text{رابطه ۴}$$

**مرحله پخت رزین و خشک کردن نمونه‌ها:** مرحله پخت رزین فورفورال/ اوره فرآیند پیچیده‌ای بود که در نهایت با آزمون‌های اولیه فراوان بهینه‌سازی شد. عدم رعایت روش مناسب پخت رزین سبب فروریختگی (کولپس) شدید نمونه‌ها می‌شد.

برای پخت رزین در چوب، از دماهای پایین استفاده شده و آهسته افزایش پیدا کرد. در گام اول نمونه‌ها در فویل آلومینیومی پیچیده شده و به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. سپس دما به ۷۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت افزایش یافت. رنگ نمونه‌ها پس از پخت با توجه به مقدار رزین بارگذاری شده تیره شده و از قهوه‌ای تا سیاه تغییر می‌یافت. پس از پخت رزین در چوب برای خشک شدن آنها از کوره کوچک چوب‌خشک کنی آزمایشگاهی استفاده شد. نمونه‌ها به مدت دو هفته در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۰ درصد خشک شدند. پس از خشک شدن نسبی، نمونه‌ها به آن ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد انتقال داده شدند و پس از رسیدن به وزن ثابت وزن ( $m_4$ ) و حجم ( $V_4$ ) خشک اجاقی آنها اندازه‌گیری شد. برای پخت رزین الکل فورفوریل نیز نمونه‌ها در داخل فویل پیچیده شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند.

**اندازه‌گیری درصد افزایش وزن و نسبت مواد مختلف در نمونه‌ها:** درصد افزایش وزن (WPG) نمونه‌ها از طریق رابطه ۱ و بر پایه نمونه‌های استفاده شده برای ویژگی‌های فیزیکی محاسبه شد:

$$WPG\% = \frac{m_4 - m_1}{m_1} \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

نسبت مواد مختلف در داخل چوب پیش از خشک کردن نمونه‌ها و در حالت خیس محاسبه شد. بدین منظور از غلظت محلول‌ها (C) استفاده شده و در مقدار جذب محلول ضرب شد. با استفاده از روابط

$$\text{ASE}\% = \frac{S_U - S_t}{S_U} \times 100 \quad \text{رابطه ۹}$$

که در آن  $S_U$  واکشیدگی نمونه شاهد در زمان غوطه‌وری  $t$  و  $S_T$  واکشیدگی نمونه تیمار شده در زمان  $t$  است.

**ویژگی‌های مکانیکی:** نمونه‌های مربوط به اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی ابتدا به مدت ۲ هفته در اتاق کلیما با رطوبت نسبی  $65 \pm 5$  درصد و دمای  $22 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد مشروط سازی شدند. تعداد نمونه مورد استفاده برای هر آزمون ۱۰ عدد بود. از دستگاه Instron 4486 برای اندازه‌گیری ویژگی‌های مختلف استفاده شد. برای اندازه‌گیری مدول گسیختگی و مدول الاستیسته و همچنین فشار موازی الیاف سرعت بارگذاری دستگاه  $10 \text{ mm/min}$  بود. مقاومت به سختی نیز با روش برینل انجام شد و مقاومت چوب در برابر نفوذ کره‌ای به قطر  $11/5$  میلی‌متر تعیین شد. آزمون مقاومت به ضربه نیز با استفاده از دستگاه پاندول ۲۰ ژول انجام شد.

**طرح آماری:** آزمون تجزیه واریانس یک طرفه برای بررسی معنی‌داری بین میانگین‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در صورت معنی‌دار بودن میانگین‌ها گروه‌بندی آنها با استفاده از آزمون دانکن در فاصله اطمینان ۹۵ درصد انجام شد.

### نتایج

**مقادیر جذب و نسبت مواد:** نتایج مربوط به نسبت مواد مختلف (از ۱۰۰ درصد) در داخل چوب و پیش از پخت رزین در جدول ۳ خلاصه شده است. با افزایش غلظت فورفورال از نسبت اوهره/ انیدرید مالئیک کاسته شد. کاهش نسبت اوهره/ انیدرید مالئیک اثر کمی بر روی آبشویی مواد داشت. مقدار آبشویی چوب‌های تیمار شده با فرمول‌بندی‌های استفاده شده در این تحقیق کمتر از ۴ درصد بود که قابل مقایسه

که در این رابطه W.L مقدار کاهش وزن (درصد)  $m_4$  وزن خشک نمونه‌ها پس از اشباع (g)،  $m_5$  وزن خشک نمونه‌ها پس از آبشویی (g) است.

**ویژگی‌های فیزیکی:** چگالی نمونه‌ها در حالت خشک اجاقی ( $D_{od}$ ) بر اساس رابطه ۵ محاسبه شده و به صورت  $\text{kg m}^{-3}$  گزارش شد.

$$D_{od} = \frac{m_4}{V_4} \quad \text{رابطه ۵}$$

اثرگذاری تیمارها در افزایش حجم نمونه‌ها (BE) نیز بر اساس رابطه ۶ محاسبه شد.

$$\text{BE}\% = \frac{V_4 - V_1}{V_1} \times 100 \quad \text{رابطه ۶}$$

جذب آب و واکشیدگی نمونه‌ها پس از غوطه‌وری آن‌ها در آب مقطر و در بازه‌های زمانی ۲، ۶، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶، ۱۲۰، ۱۴۴، ۱۶۸، ۱۹۲، ۲۴۰، ۲۶۴، ۲۸۸، ۳۱۲ و ۳۳۶ ساعت (دو هفته) با اندازه‌گیری وزن و حجم آن‌ها محاسبه شد. پس از هر مرحله مقدار جذب آب (WA%) و واکشیدگی حجمی (S%) نمونه‌ها به ترتیب با روابط ۷ و ۸ محاسبه شد.

$$\text{WA}\% = \frac{M_t - m_4}{m_4} \times 100 \quad \text{رابطه ۷}$$

که در آن  $M_t$  وزن نمونه بعد از غوطه‌وری در آب در زمان مشخص  $t$  و  $m_4$  وزن نمونه قبل از غوطه‌وری در آب و بعد از تیمار است.

$$\text{S}\% = \frac{V_t - V_4}{V_4} \times 100 \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن  $V_t$  حجم نمونه بعد از غوطه‌وری در آب در زمان مشخص  $t$  و  $V_4$  حجم نمونه بعد از تیمار و پخت رزین است.

همچنین کارائی ضد واکشیدگی (ASE) نمونه‌ها نیز به ترتیب در دوره‌های ۲، ۲۴، ۴۸، ۷۲ و ۹۶ ساعت غوطه‌وری در آب با استفاده از رابطه ۹ اندازه‌گیری شد.

با افزایش غلظت مواد در محلول‌های اشباع به‌طور خطی بر مقدار افزایش وزن (WPG) نمونه‌ها پس از پخت رزین افزوده شد. مقادیر WPG به‌دست آمده با داده‌های گزارش شده برای چوب‌های اصلاح شده با الکل فورفوریل هم‌خوانی دارد (۱). چوب‌های اصلاح شده با الکل فورفوریل بسته به نوع کاربرد معمولاً در دو WPG مختلف در دامنه ۲۰-۳۰ درصد و ۴۰-۷۰ تولید می‌شوند (۱). اغلب ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چوب تحت تأثیر مقدار WPG نمونه‌ها بوده و با کم و زیاد شدن آن تغییر می‌کند (۲۷).

برای مقادیر گزارش شده در مورد چوب‌های اصلاح شده با الکل فورفوریل است. دانگ و همکاران (۲۰۱۶) آبشویی مواد از چوب اکالیپتوس (*Eucalyptus robusta*) فورفوریله شده را بررسی کرده و بیان کردند در مقادیر درصد افزایش وزن ۷۰-۳۰ درصد مقدار آبشویی مواد ۷-۵ درصد است (۸). سجاتی و همکاران (۲۰۱۷) نیز اعلام کردند نرخ آبشویی مواد از چوب راش اصلاح شده با الکل فورفوریل در حدود ۴-۳ درصد است. مقدار کم آبشویی مواد نشان‌دهنده تبدیل ترکیبات اولیه به یک بسیار غیرقابل حل در آب است (۱۴).

جدول ۳- نسبت مواد مختلف در داخل چوب پس از تیمار و همچنین مقادیر افزایش وزن (WPG) و نرخ آبشویی مواد.

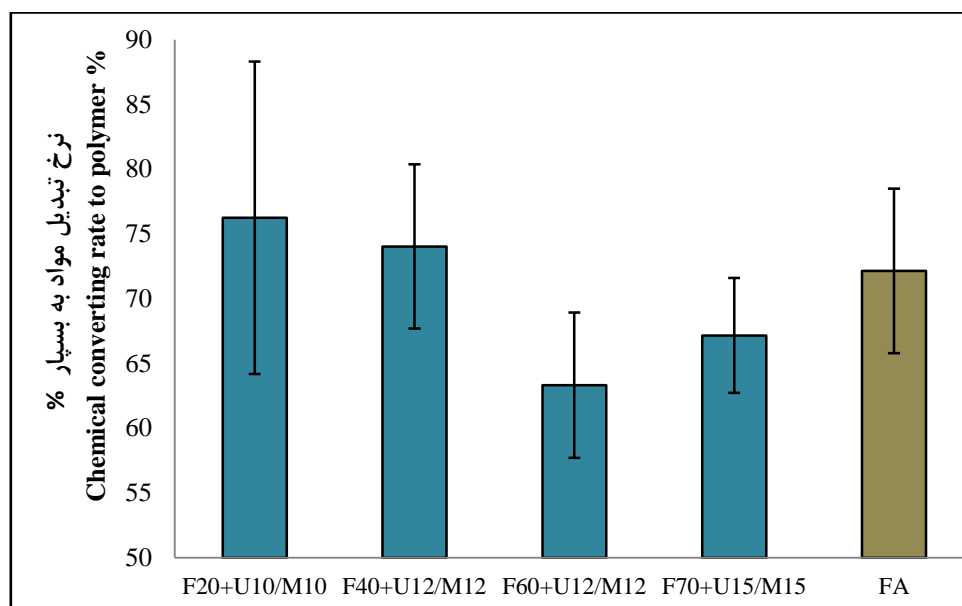
Table 3. Ratio of different chemicals in the wood after treatment as well as leaching rate and weight percentage gain (WPG).

| درصد افزایش وزن | نرخ آبشویی      | انیدرید مالئیک   | اوره | فورفورال | تیمار   | ردیف |
|-----------------|-----------------|------------------|------|----------|---|------|
| WPG %           | Leaching Rate % | Maleic Anhydride | Urea | Furfural | Treatment   | No.  |
| 27.29 ± 3.53    | 2.59 ± 0.21     | 28.3             | 28.3 | 43.4     | F <sub>20</sub> +U <sub>10</sub> /M <sub>10</sub> | 1    |
| 37.35 ± 4.56    | 2.06 ± 0.89     | 21.9             | 21.9 | 56.2     | F <sub>40</sub> +U <sub>12</sub> /M <sub>12</sub> | 2    |
| 43.48 ± 5.81    | 3.92 ± 0.30     | 16.4             | 16.4 | 67.3     | F <sub>60</sub> +U <sub>12</sub> /M <sub>12</sub> | 3    |
| 57.65 ± 8.57    | 3.71 ± 0.43     | 17.2             | 17.2 | 65.6     | F <sub>70</sub> +U <sub>15</sub> /M <sub>15</sub> | 4    |
| 36.74 ± 4.34    | 3.03 ± 0.46     | -                | -    | -        | FA  | 5    |
| -               | 0.63 ± 0.23     | -                | -    | -        | C   | 6    |

فورفورال و در نتیجه کاهش نسبت اوره/ انیدرید مالئیک می‌تواند دلیل اصلی این موضوع باشد. در واقع فورفورال به‌عنوان یک آلدهید، واکنش‌گر ثانویه کافی برای بسپارش در اختیار نداشته است و در حین فرآیند پخت رزین بخار شده است. در تیمار F<sub>60</sub>+U<sub>12</sub>/M<sub>12</sub> در مقایسه با تیمار F<sub>70</sub>+U<sub>15</sub>/M<sub>15</sub> نسبت اوره/ انیدرید مالئیک به فورفورال بیشتر بود که در نتیجه آن نرخ تبدیل مواد به بسپار کمی بیشتر شده است.

در شکل ۲ درصد تبدیل مواد به بسپار بر اساس وزن خشک قبل از آبشویی نمونه‌ها نمایش داده شده است. در حین فرآیند پخت رزین در چوب در حدود ۴۰-۲۰ درصد مواد فعال داخل چوب از دست رفت. هدر رفت مواد در تیمار انجام شده با الکل فورفوریل نیز در حدود ۲۷ درصد بود. این مقدار در مورد چوب‌های اصلاح شده با الکل فورفوریل به شیوه صنعتی نیز معمول است (۱۳). در مقادیر WPG پایین، مقدار هدر رفت مواد کمتر بود. افزایش غلظت



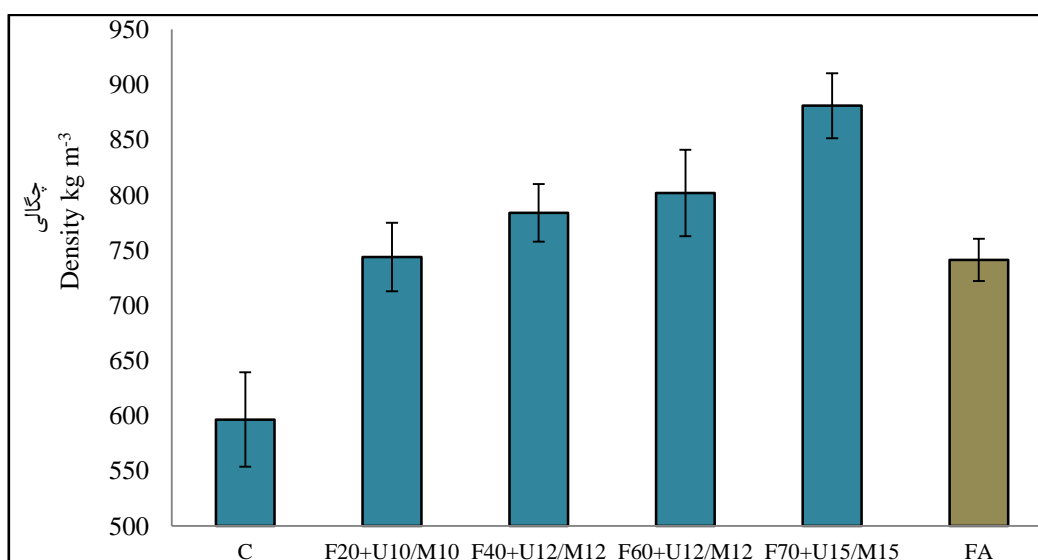


شکل ۲- نرخ تبدیل مواد به بسپار طی مرحله پخت.

Figure 2. Chemicals converting rate into the polymer during curing process.

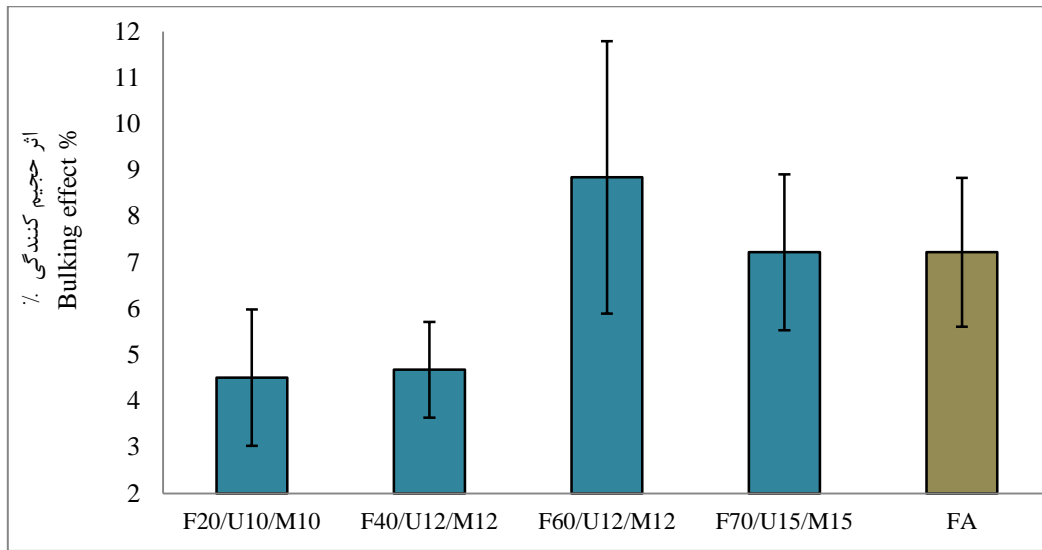
است. چوب صنوبر اصلاح شده با الکل فورفوریل در WPG در حدود ۱۰۰ درصد دارای ۸ درصد افزایش حجم نسبت به حالت قبل از تیمار است که برابر با چوب استیله شده با WPG تقریباً ۱۸ درصد است (۸). افزایش چگالی در چوب‌های تیمار شده با الکل فورفوریل برای برخی از کاربردها، جزء معایب آنها بر شمرده می‌شود (۲۸).

چگالی و اثر حجیم‌کنندگی: در شکل ۳ اثر تیمارها بر روی چگالی نمونه‌ها نمایش داده شده است. با افزایش غلظت مواد در محلول‌های اشباع و در نتیجه افزایش WPG، بر چگالی چوب افزوده شد. البته تیمارهای انجام شده اثرهای حجیم‌کننده نیز داشتند که در شکل ۴ نمایش داده شده است. در واقع همراه با افزایش وزن، مقداری افزایش حجم نیز وجود داشته



شکل ۳- اثر تیمارهای مختلف بر روی چگالی چوب.

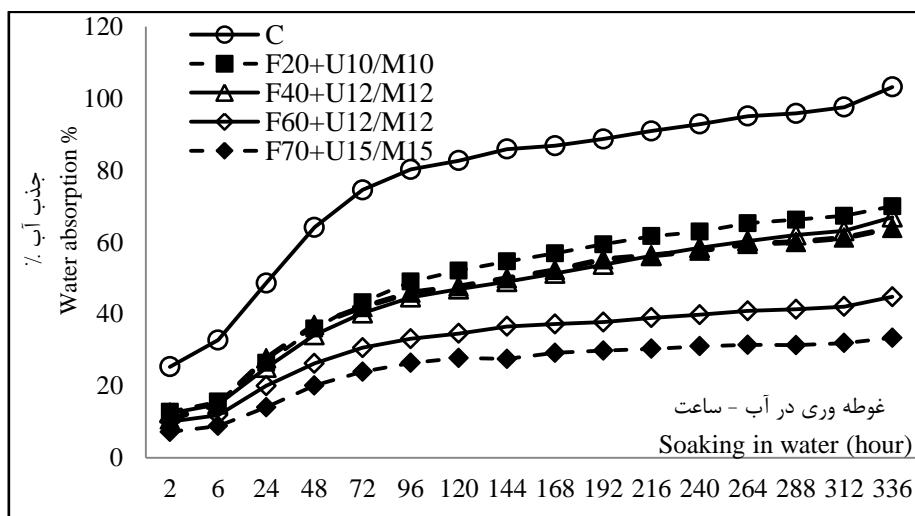
Figure 3. Effect of different treatments on the modified wood density.



شکل ۴- اثر حجمیم کنندگی تیمارهای مختلف بر چوب.  
Figure 4. Bulking effect of different treatment on wood.

الکل فورفوریل اصلاح شده بودند اثر قابل توجه WPG بر روی جذب آب را تایید می‌کند (۸). در واقع با افزایش مقدار جذب ماده در داخل چوب، از فضاهای متخلخل قابل دسترسی برای جذب آب کاسته می‌شود. از طرف دیگر ترکیبات فورانی ساختار فنولی داشته و قابلیت پیوند شیمیایی با لیگنین دیواره‌های سلولی را دارند (۲۹) که می‌تواند روند جذب آب را کاهش دهد.

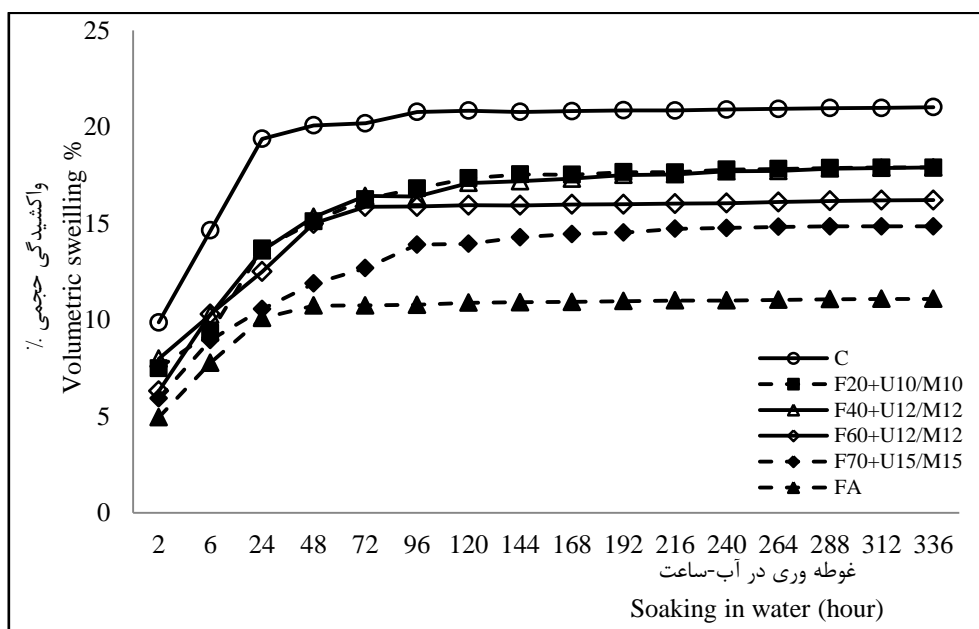
جذب آب و واکنشیدگی ابعاد: مقادیر جذب آب تیمارهای مختلف پس از ۱۴ روز غوطه‌وری در آب در شکل ۵ نمایش داده شده است. کمترین مقدار جذب آب مربوط به تیمار  $F_{70}+U_{15}/M_{15}$  است که بیشترین WPG را داشته است. روند جذب آب در تیمار  $F_{40}+U_{12}/M_{12}$  و FA بسیار شبیه هم بود. شایان ذکر است مقادیر WPG این دو تیمار نیز تقریباً یکسان است. نتایج تحقیق دانگ و همکاران (۲۰۱۶) بر روی جذب آب چند گونه مختلف چوب که با



شکل ۵- مقادیر جذب آب نمونه‌ها در تیمارهای مختلف پس از ۱۴ روز غوطه‌وری در آب.  
Figure 5. Water absorption of samples from different treatments after 14 days soaking in water.

اینکه مقدار WPG این دو تیمار در حدود ۱۰ درصد تفاوت داشت. مقادیر کارائی ضد واکشیدگی مربوطه به تیمارهای مختلف در بازه‌های زمانی مختلف در جدول ۴ گزارش شده است. مقدار کارائی ضد واکشیدگی نمونه‌های تیمار شده با الکل فورفوریل قابل توجه بود. پیوندهای عرضی رزین آب‌گریز پلی الکل فورفوریل با گروه‌های آلدوست دیواره سلولی و همچنین پر شدن منافذ با آن از دلایل این موضوع ذکر شده است (۷ و ۳۰).

واکشیدگی ابعاد و کارائی ضد واکشیدگی : مقادیر واکشیدگی حجمی تیمارهای مختلف و روند آن طی ۱۴ روز غوطه‌وری در آب در شکل ۶ نمایش داده شده است. همه تیمارها به استثناء تیمار با الکل فورفوریل، پس از ۹۶ ساعت غوطه‌وری در آب به حداکثر واکشیدگی رسیدند. نمونه‌های تیمار شده با الکل فورفوریل خیلی زودتر و در مدت ۴۸ ساعت به حداکثر ظرفیت واکشیدگی خود دست یافتند. روند تغییرات واکشیدگی ابعاد در تیمارهای  $F_{20}+U_{12}/M_{12}$  و  $F_{40}+U_{12}/M_{12}$  بسیار شبیه و منطبق بر هم بود، با



شکل ۶- مقادیر واکشیدگی حجمی نمونه‌های چوبی در تیمارهای مختلف پس از ۱۴ روز غوطه‌وری در آب.

Figure 6. Volumetric swelling of wood samples from different treatments after 14 days soaking in water.

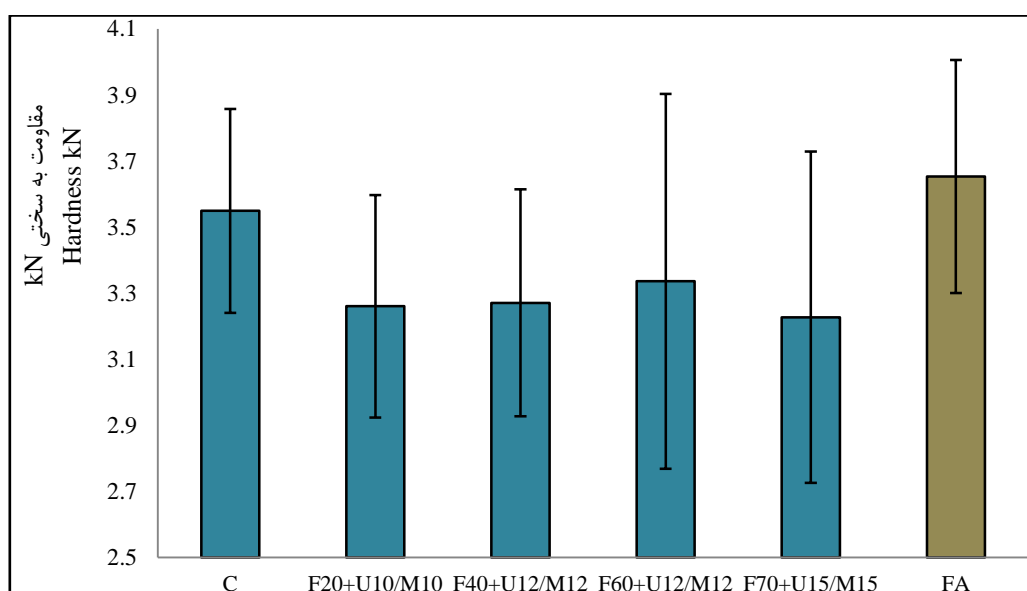
جدول ۴- مقادیر کارائی ضد واکشیدگی در تیمارهای مختلف در زمان‌های متفاوت غوطه‌وری در آب.

Table 4. Anti-swelling efficacy of different treatments at various soaking times in the water.

| کارائی ضد واکشیدگی درصد در زمان‌های مختلف (ساعت)   |       |       |       |       | تیمار<br>Treatment     | ردیف<br>No. |
|--|-------|-------|-------|-------|------------------------|-------------|
| Anti-swelling efficacy % for increasing soaking period (hour) in different period (hour) |       |       |       |       |                        |             |
| 96   | 72    | 48    | 24    | 2     |                        |             |
| 23.80  | 23.27 | 29.88 | 30.66 | 36.18 | $F_{20}+U_{10}/M_{10}$ | 1           |
| 19.49  | 22.48 | 29.30 | 29.60 | 29.84 | $F_{40}+U_{12}/M_{12}$ | 2           |
| 22.21  | 25.13 | 31.17 | 35.53 | 36.05 | $F_{60}+U_{12}/M_{12}$ | 3           |
| 33.73  | 40.14 | 45.44 | 45.54 | 56.93 | $F_{70}+U_{15}/M_{15}$ | 4           |
| 48.33  | 48.59 | 46.09 | 46.84 | 49.88 | FA                     | 5           |

اصلی افت مقاومت به سختی نمونه‌ها بر اثر تیمار با ترکیب فورفورال/ اوره باشد. اغلب تحقیقات انجام شده بر روی مقاومت به سختی چوب‌های تیمار شده با فرمولاسیون‌های تجاری بر پایه الکل فورفوریل حاکی از افزایش مقاومت به سختی نمونه‌ها است. استیوز و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند مقاومت به سختی چوب کاج اصلاح شده با الکل فورفوریل در WPG میانگین ۳۸ درصد در حدود ۵۰ درصد افزایش می‌یابد (۹).

**مقاومت‌های مکانیکی:** مقاومت به سختی تیمارهای مختلف در شکل ۷ نمایش داده شده است. آزمون تجزیه واریانس اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها نشان نداد که می‌تواند به دلیل انحراف معیار زیاد داده‌ها باشد. در هر حال، تیمار چوب با فرمول‌های بر پایه فورفورال/ اوره سبب کاهش نسبی مقاومت به سختی نمونه‌ها شد. اما اصلاح چوب با الکل فورفوریل موجب کاهش میانگین مقاومت به سختی نمونه‌ها نشد. به نظر می‌رسد اسیدیته زیاد محلول‌های اشباع و همچنین کولیس نمونه‌ها در مرحله پخت رزین، عامل



شکل ۷- مقاومت به سختی در تیمارهای مختلف.

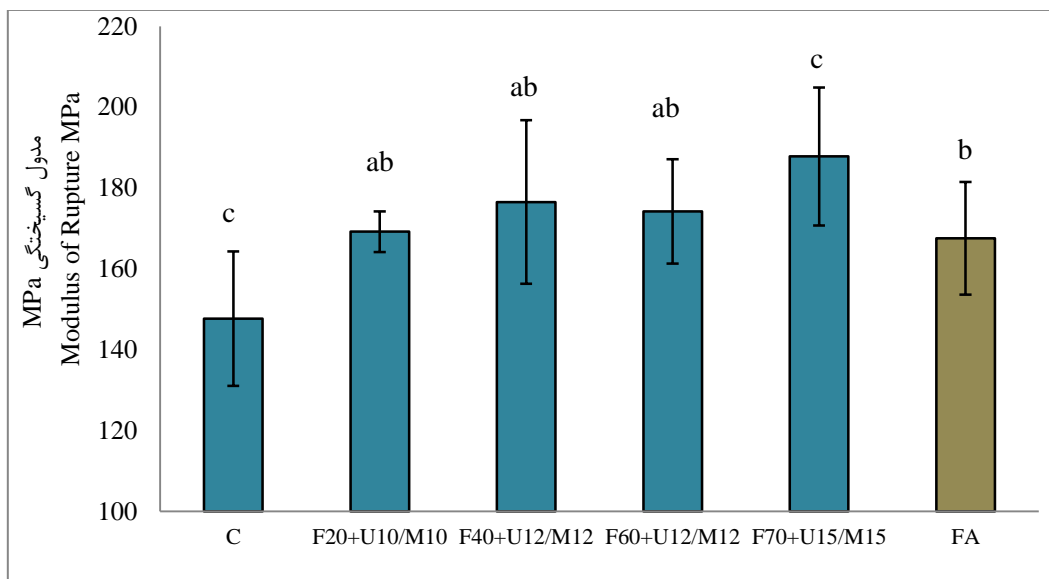
Figure 7. Hardness resistance of wood samples from different treatments.

افزایشی داشت. اثر تیمار با الکل فورفوریل نیز بر روی این دو صفت مکانیکی افزایشی بود. اثر تیمار چوب با الکل فورفوریل بر ویژگی‌های مکانیکی چوب بارها گزارش شده است. اما مطالعات گاهی هم‌سو نبوده و نتایج بسته به شرایط آزمون و گونه‌های چوب مورد استفاده متفاوت بوده است. به‌عنوان مثال در مورد گونه کاج فورفوریل‌اسیون موجب کاهش ۱ درصدی MOE بوده است (۹) در حالی‌که در مورد گونه راش افزایش ۴۰ درصدی

در شکل‌های ۸ و ۹ مقادیر مدول گسیختگی (MOR) و مدول الاستیسیته (MOE) تیمارهای مختلف نمایش داده شده است. آزمون تجزیه واریانس نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین میانگین داده‌ها بود و آزمون دانکن آنها را در گروه‌های مختلفی قرار داد که به‌صورت حروف لاتین بر روی ستون‌ها مشخص شده است. تیمار چوب با فرمول‌بندی‌های بر پایه فورفورال/ اوره سبب افزایش مقادیر مدول گسیختگی و مدول‌الاستیسیته شد که با افزایش WPG روند

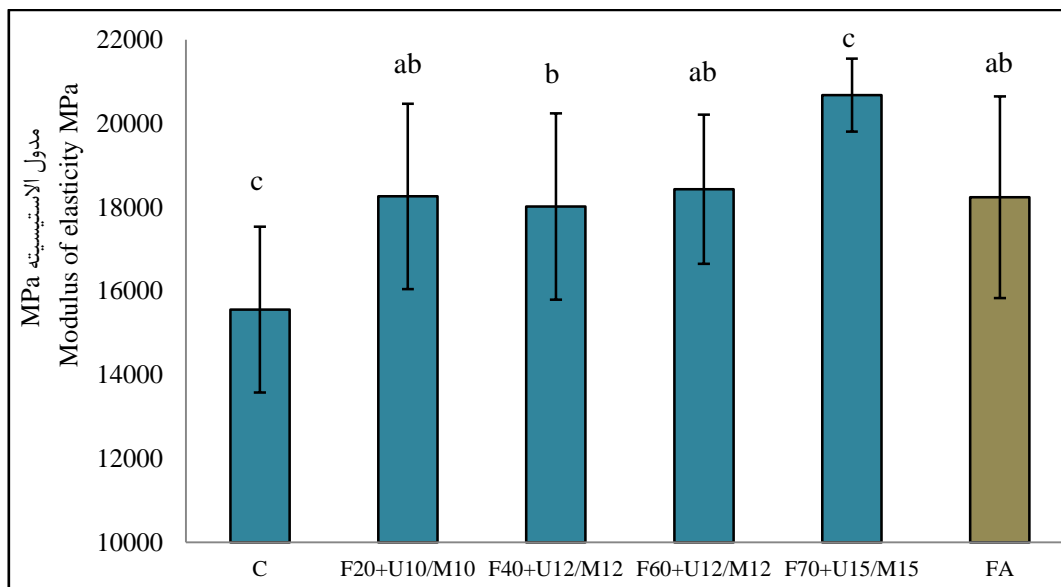
چوب و همچنین فرآیند پخت رزین موجب کولپس (فروریختگی) و ترک‌های ریز میکروسکوپی در دیواره‌های سلولی می‌شود (۳۲ و ۳۳).

گزارش شده است (۳۱). از معایب روش اصلاح چوب با ترکیبات فورانی اسیدیته بالای محلول‌های اشباع است که اغلب بسته به شرایط آزمون و گونه



شکل ۸- مدول گسیختگی در تیمارهای مختلف.

Figure 8. Modulus of Rupture of wood samples from different treatments.



شکل ۹- مدول الاستیسیته در تیمارهای مختلف.

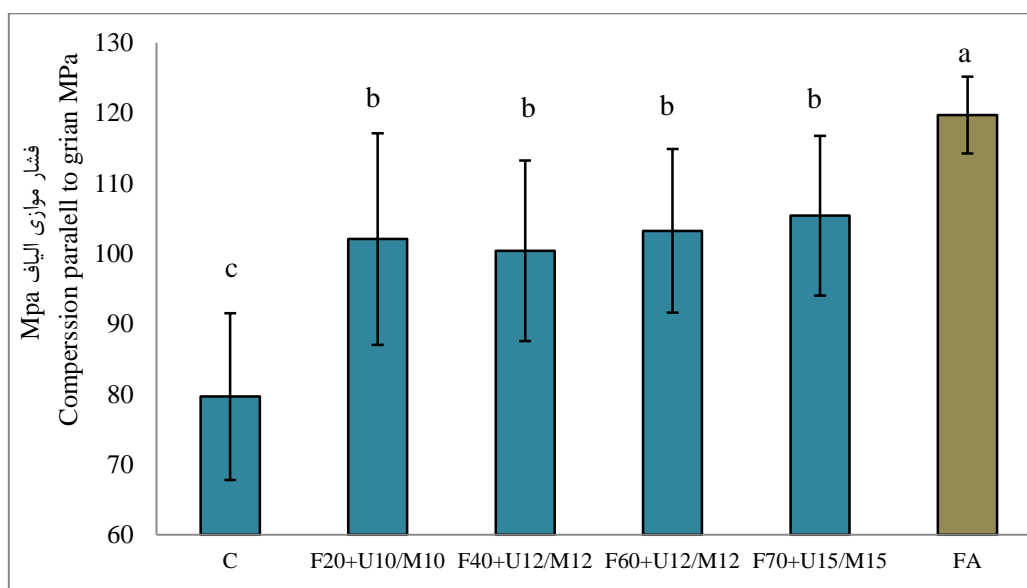
Figure 9. Modulus of Elasticity of wood samples from different treatments.

همه تیمارهای مربوط به فرمول‌های بر پایه فورفورال / اوره را در یک مجموعه گروه‌بندی کرد (حروف لاتین داخل شکل). رزین بسیار شده فورفورال / اوره بسیار

در شکل ۱۰ نتایج اندازه‌گیری فشار موازی الیاف نمایش داده شده است. مقادیر فشار موازی الیاف با افزایش WPG تفاوت چندانی نداشت و آزمون دانکن

افزایش می‌داد. تیمار چوب با الکل فورفوریل بیشترین اثر افزایشی را بر فشار موازی الیاف داشت و میانگین داده‌های آن در یک گروه مستقل قرار گرفت. بر خلاف دیگر ویژگی‌های مکانیکی اغلب تحقیقات به افزایش فشار موازی الیاف بر اثر تیمار چوب با الکل فورفوریل اشاره کرده‌اند (۳۰، ۳۱، ۳۳ و ۳۴).

سخت بود و تصور می‌شد با افزایش مقدار WPG بر فشار موازی الیاف افزودن شود که چنین نتیجه‌ای به دست نیامد. با افزایش غلظت فورفورال و در نتیجه اسیدیته محلول، اثر تخریبی بر روی چوب به‌ویژه در مورد برخی از ویژگی‌های مکانیکی آشکار می‌شود. شایان ذکر است افزودن بافر برای کنترل اسیدیته نیز سبب تداخل در گیرائی رزین شده و آبشویی آن را

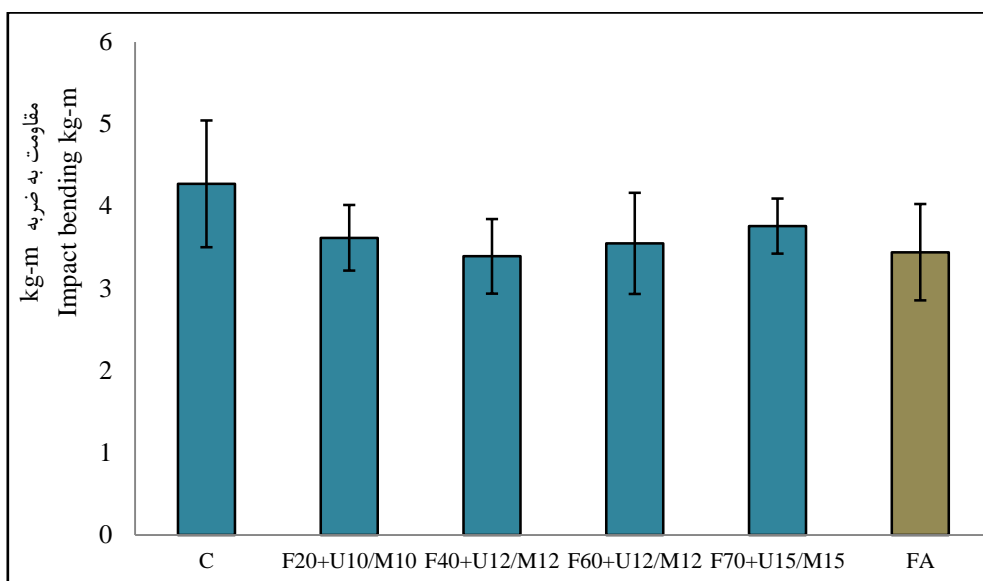


شکل ۱۰- مقاومت به فشار موازی الیاف در تیمارهای مختلف.

Figure 10. Compression resistance of parallel to the grain of wood samples from different treatments.

در مورد مقاومت به ضربه چوب‌های اصلاح شده با الکل فورفوریل وجود ندارد. در تعدادی از گزارش‌ها کاهش مقاومت به ضربه و همچنین کشش عمود بر الیاف گزارش شده است که دلیل آن ترک‌های ریز میکروسکوپی داخل دیواره سلول‌های چوبی ذکر شده است (۲۷ و ۳۱).

در شکل ۱۱ مقاومت به ضربه (مقاومت به ضربه) تیمارهای مختلف نمایش داده شده است. اگرچه آزمون تجزیه واریانس اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای مختلف نشان نداد اما میانگین داده‌ها بر اثر تیمار با این فرمول‌بندی‌ها کاهش یافت. تیمار با الکل فورفوریل نیز با وجود داشتن شرایط اسیدیته خنثی‌تر سبب کاهش مقاومت به ضربه شد. اطلاعات زیادی



شکل ۱۱- مقاومت به مقاومت به ضربه در تیمارهای مختلف.

Figure 11. Resistance to the impact bending of wood samples from different treatments.

می‌یابد. از طرفی دیگر pH اسیدی نیز اثر تخریبی بر روی چوب دارد که موجب فروریختگی و ترک‌های میکروسکوپی در دیواره‌های سلولی می‌شود و به دنبال آن برخی ویژگی‌های مکانیکی افت می‌کنند.

### تشکر و قدردانی

این مقاله با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم و تحقیقات (CISSC) و همچنین بخش فرهنگی سفارت جمهوری فرانسه (Campus France) در ایران و در قالب طرح جندی شاپور تهیه شده است.

### نتیجه‌گیری

تیمار چوب با ترکیب فورفورال/ اوره به‌ویژه در مقادیر WPG بالا پتانسیل خوبی برای اصلاح اغلب ویژگی‌های چوب را دارد. البته مطالعات در این زمینه در ابتدای کار بوده و تا دست‌یابی به یک فرمول‌بندی مناسب راه زیادی وجود دارد. اغلب تحقیقات انجام شده در این زمینه به‌صورت ثبت اختراع است و از چگونگی تهیه محلول‌های اشباع اطلاعات زیادی در دست نیست. اسیدیته بالای محلول اشباع بر پایه فورفورال یکی از مواردی است که باید مورد بررسی قرار گیرد. در صورت استفاده از pH قلیایی گیرائی رزین دچار اختلال شده و نرخ آبشویی مواد افزایش

### منابع

- Buchelt, B., Dietrich, T., and Wagenführ, A. 2012. Macroscopic and microscopic monitoring of swelling of beech wood after impregnation with furfuryl alcohol. *European Journal of Wood and Wood Products*. 70: 6. 865-869.
- Gindl, W., Zargar-Yaghubi, F., and Wimmer, R. 2003. Impregnation of softwood cell walls with melamine-formaldehyde resin. *Bioresource*
- Hill, C.A.S. 2006. *Wood Modification Chemical, Thermal and Other Processes*, John Wiley and Sons. 260p.
- Li, Y. 2011. *Wood-Polymer Composites*, In: *Advances in Composite Materials-Analysis of Natural and Man-Made Materials*, Dr. Pavla Tesinova (Ed.), ISBN: 978-953-307-449-8, InTech, Chapters published. Pp: 229-284.

- crystals. 484: 1. 37-41.
14. Sejati, P., Imbert, A., Gérardin-Charbonnier, C., Dumarçay, S., Fredon, E., and Masson, E. 2017. Tartaric acid catalyzed furfurylation of beech wood. *Wood Science and Technology*. 51: 2. 379-394.
  15. Schneider, M.H., and Phillips, J.G. 2007. High weight percent gain (WPG) furfural-urea modification of wood, US20090004495A1. 1-4.
  16. Ahmadi, H., Hamassi, H., and Mahdavi, S. 2015. Investigation on mechanical properties of composite from recycled HDPE filled by furfural residue produced from bagass. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research.*, 30: 3. 376-387. (In Persian)
  17. Sabeti Fard, S.H., Cultural, R., and Foroughi Rad, A. 2014. Removal of furfural coke using antioxidant compounds in oil refineries. In: *Second International Conference on Oil, Gas and Petrochemicals*, Shahid Beheshti University. Tehran. Iran. (In Persian)
  18. Schneider, M.H., and Phillips, J.G. 2007. Waterborne furfural-urea modification of wood, US 2009/0005504 A1. 1-6.
  19. Atkinson, M. 1992. *Betula pendula* Roth (*B. verrucosa* Ehrh.) and *B. pubescens* Ehrh. *Journal of Ecology.*, 80: 4. 837-870.
  20. EN 350. 2016. Durability of wood and wood based products, Testing and classification of the durability agents to biological agents of wood and wood based materials, ISSN 0335-3931.
  21. ISO 13061-13. 2016. Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 13: Determination of radial and tangential shrinkage.
  22. ISO 13061-2. 2014. Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests.
  23. ISO 13061-12. 2014. Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 12: Determination of static Technology. 83: 3. 325-330.
  5. Mai, C., and Militz, H. 2004. Modification of wood with silicon compounds. *Inorganic silicon compounds and sol-gel systems: a review*. *Wood Science and Technology*. 37: 5. 339-348.
  6. Keyoumu, A., McDonald, A.G., Gorman, T. 2007. Ponderosa Pine wood enhancement by resin treatment. In: *The Third European Conference on Wood Modification*. Pp: 267-270.
  7. Gérardin, P. 2016. New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood— a review. *Annals of Forest Science.*, 73: 3. 559–570.
  8. Dong, Y., Qin, Y., Wang, K., Yan, Y., Zhang, S., Li, J., and Zhang, S. 2016. Assessment of the performance of furfurylated wood and acetylated wood: Comparison among four fast-growing wood species. *BioResources.*, 11: 2. 3679-3690.
  9. Esteves, B., Nunes, L., Pereira, H. 2011. Properties of furfurylated wood (*Pinus pinaster*). *European Journal of Wood and Wood Products*. 69: 4. 521-525.
  10. Abdolzadeh, H., Ebrahimi, Layeghi, G.M., Mirshokrai, SA. 2013. Mechanical properties of Beech - Furfuryl alcohol wood polymer. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*. 4: 2. 143-155. (In Persian)
  11. Larnøy, E., Lande, S., Vestøl, GI. 2008. Variations of Furfuryl alcohol and Wolmanit CX-8 treatability of pine sapwood within and between trees. *International Research Group on Wood Preservation*. IRG/WP Document 08-4042. 25-29 May, Istanbul, Turkey.
  12. Treu, A., Pilglard, A., Puttmann, S., Krause, A., and Westin, M. 2009. Material properties of furfurylated wood for window production. *The International Research Group on Wood Protection*. IRG/WP Document 09-40480. 24-28 May, Beijing, China.
  13. Lande, S., Westin, M., and Schneider, M. 2008. Development of modified wood products based on furan chemistry. *Molecular crystals and liquid*



- Wood Science and Technology. 44: 1. 51-65.
30. Li, W., Wang, H., and Ren, D. 2015. Wood modification with furfuryl alcohol catalysed by a new composite acidic catalyst. Wood Science and Technology., 49: 4. 845-856.
31. Abdolzadeh, H., Layeghi, M., Ebrahimi, G., and Ghassemieh, M. 2014. Fracture behavior of beech-furan wood/polymer under mode I. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research. 29: 4. 609-622. (In Persian)
32. Epmeier, H., Westin, M., and Rapp, A. 2004. Differently modified wood comparison of some selected properties. Scandinavian Journal of Forest Research., 19: 5. 31-37.
33. Li, W., Zhang, XX., Yu, Z., Yu, Y.S., and Yu, Y. 2017. Determining the curing parameters of furfuryl alcohol for wood modification by nanoindentation. European Journal of Wood and Wood Products., 75: 1. 81-86.
34. Dong, Y., Yan, Y., Zhang, S., and Li, J. 2014. Wood/polymer nanocomposites prepared by impregnation with furfuryl alcohol and Nano-SiO<sub>2</sub>. BioResources., 9: 4. 6028-6040.
- hardness.
24. ISO 13061-17. 2014. Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens- Part 17: Determination of ultimate stress in compression parallel to grain.
25. ISO 13061-10. 2014. Physical and mechanical properties of wood- Test methods for small clear wood specimens - Part 10: Determination of impact bending strength.
26. ISO 13061-3. 2014. Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 3: Determination of ultimate strength in static bending.
27. Lande, S., Westin, M., and Schneider, M.H. 2004. Properties of furfurylated wood. Scandinavian Journal of Forest Research., 19: 5. 22-30.
28. Reinprecht, L. 2016. Wood Deterioration, Protection and Maintenance. John Wiley and Sons. 376p.
29. Thygesen, L.G., Barsberg, S., and Venås, T.M. 2010. The fluorescence characteristics of furfurylated wood studied by fluorescence spectroscopy and confocal laser scanning microscopy.



## Evaluation of Furfural/Urea complexes to improve physico-mechanical properties of birch wood

\*D. Efhamisizi<sup>1</sup>, M. Sharifat<sup>2</sup>, M. France Thevenon<sup>3</sup>, A. Taromian<sup>4</sup> and M. Jonoobi<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Assistant Prof. Dept., of Wood and Paper Sciences and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, <sup>2</sup>M.Sc. Graduated in Wood Sciences and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, <sup>3</sup>Head of the Wood Preservation Laboratory, CIRAD, UR BIOWooEB, TA B-114/16, 73 rue Jean-François Breton, F-34398 Montpellier Cedex 5, France, BIOWooEB, Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier, France, <sup>4</sup>Associated Prof., Dept., of Wood and Paper Sciences and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, <sup>5</sup>Associated Prof., Dept., of Wood and Paper Sciences and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran

Received: 06/19/2018; Accepted: 06/08/2018

### Abstract

**Background and objectives:** Impregnation of wood with different monomers and their conversion to the un-leachable reacted polymers inside the wood causes a new product which is called wood polymer. The furan compounds such as Furfuryl alcohol (FA) is commercially used for wood modification, producing then wood polymer. Wood is impregnated with FA, convert to the polyFA by heating. Furfural which is in fact the primary raw material in the manufacture of FA is extensively manufactured in Iran from residues of sugar cane. Furfural could not be easily polymerized alone like FA; however it is an aldehyde which can react with urea to make polymer network. In this study, the possibility of furfural/urea polymer along with acidic catalyzer (maleic anhydride) was evaluated for the improvement of physico-mechanical properties of birch wood.

**Methods and Materials:** Birch wood (*Betula sp.*) imported from Russia was used for experiments. With a double treatment procedure Furfural+Urea/Maleic anhydride was impregnated into the wood according to a 2 steps vacuum/pressure technology: (1) diluted furfural in water and methanol, followed by (2) Urea/Maleic anhydride aqueous solution. For making comparison between the results, a commercial formulation based on the FA was also used as a reference. The mixes impregnated into the wood were polymerized by heating. Then, different physico-mechanical properties of wood samples were measured according to the standard guidelines of ISO 13061 series.

**Results:** The proportion of Furfural+Urea/Maleic anhydride was appropriately selected, and approximately 60 to 80% were converted to the polymer. The leaching rate of the products once polymerized within the treated wood was around 4% which is comparable to the results of commercial formulation based on FA. The weight percentage gain (WPG) of the wood samples varied between 27 to 57% depending on the furfural concentration in the treatment solutions. Despite the bulking effect, the density of samples after treatment increased significantly. The water absorption during samples soaking in the water is clearly linked with the WPG, and decreases with the increase of WPG. The volumetric swelling of the samples treated with the combination of furfural+urea/maleic anhydride also follows the same trend. However, the lowest volumetric swelling was obtained with the treatment with FA. The mechanical resistance evaluation showed that wood treatment by furfural +urea/maleic anhydride reduced the hardness and the impact bending of wood, while static strength such as the modulus of rupture, modulus of elasticity, and compression parallel to the grain increased. The treatment with FA also reduced the resistance of wood against impact bending.

**Conclusion:** Wood treatment with the complex of furfural+urea/maleic anhydride, especially at high WPG levels, has a good potential for improving most wood properties. The high acidity of furfural based solution is one of the issues requiring additional studies. If the alkaline pH is used, the curing of the resin will be disturbed and the leaching rate will increase. On the other hand, acidic pH also has a negative impact on wood properties.

**Keywords:** Birch (*Betula sp.*), Furfural, Furfuryl alcohol, Urea, Physical-mechanical properties

---

\*Corresponding Author: efhami@ut.ac.ir